

# QUALIDADE DE ÁGUAS PLUVIAIS NA ZONA BAIXA DE ALCÂNTARA, EM LISBOA

## STORMWATER QUALITY IN THE DOWNTOWN AREA OF ALCÂNTARA, IN LISBON

Filipa FERREIRA

Professora Auxiliar do Instituto Superior Técnico, IST /// Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa /// filipaf@civil.ist.utl.pt

José S. MATOS

Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico, IST /// Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa /// jsm@civil.ist.pt

**RESUMO:** As águas pluviais transportam diversos poluentes acumulados à superfície das bacias de drenagem em tempo seco, que resultam sobretudo de atividades urbanas e do tráfego. A carga poluente que lhes está associada pode ser, durante períodos significativos, superior à das águas residuais domésticas. Nesta comunicação é divulgado o trabalho efetuado na zona baixa de Alcântara, em Lisboa, a fim de caracterizar a qualidade das águas pluviais em meio urbano. O trabalho experimental consistiu na recolha de amostras de águas pluviais à entrada de seis dispositivos interceptores, com vista à determinação de parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

A concentração média observada para CQO, SST e coliformes fecais foi de 186 mg/l, 310 mg/l e  $3 \times 10^6$  NMP/100 ml, respetivamente. Os elevados valores médios referentes às concentrações em coliformes fecais e CQO merecem relevo, uma vez que evidenciam o significativo impacto no meio recetor, em resultado da descarga de escorrências pluviais.

Verifica-se a existência de uma forte correlação entre as concentrações em SST e em CQO das águas pluviais. Adicionalmente, verifica-se que os parâmetros físico-químicos se encontram sobretudo correlacionados com o período de tempo seco antecedente, mas também com as intensidades máxima e média da precipitação.

Foram deduzidas e validadas equações que permitem avaliar as concentrações médias em CQO das águas pluviais na zona baixa de Alcântara, tendo em conta o período de tempo seco antecedente e a intensidade da precipitação.

**Palavras-chave:** águas pluviais, cargas poluentes, meio urbano.

**ABSTRACT:** Stormwater carries many pollutants accumulated on the surface of urban catchments during the dry period, mainly resulting from the urban activities and from the traffic. The pollution loads associated with stormwater can be, for significant periods, higher than those of domestic wastewaters. This communication focuses on the characterization of stormwater in the downtown area of Alcântara, in Lisbon. The experimental work involved the collection of stormwater in six interceptor devices, for the determination of physicochemical and microbiological parameters.

The average concentration for COD, TSS and fecal coliforms were, respectively, 186 mg/l, 310 mg/l and  $3 \times 10^6$  NMP/100 ml. These average values deserve emphasis, since they show the significant impact that direct discharges of stormwater may have in receiving waters.

The data were submitted to correlation tests and regression analysis in order to develop simplified models to forecast the quality of urban stormwater runoff, considering the main characteristics of the rainfall events as explanatory variables. The physicochemical parameters were primarily correlated with the antecedent dry weather period, but also with the maximum and average precipitation intensity.

Equations for assessing the COD average concentrations in stormwater runoff in the lower zone of Alcântara were derived and validated, given the antecedent dry period and the precipitation intensity.

**Keywords:** stormwater quality, pollution loads, urban areas.

## 1. INTRODUÇÃO

As águas pluviais transportam diversos poluentes acumulados à superfície das bacias de drenagem em tempo seco, que resultam sobretudo de atividades urbanas e do tráfego. A carga poluente que lhes está associada pode ser, durante períodos significativos, superior à das águas residuais domésticas. Neste contexto, vários estudos têm sido efetuados em diversos países do mundo com o intuito de caracterizar a qualidade das águas pluviais em meio urbano (Field *et al.*, 2003; Choe *et al.*, 2002; Gnecco *et al.*, 2005; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999; Taebi e Droste, 2004); citados por Ferreira, 2006). Os resultados obtidos nos diversos estudos permitiram concluir que os fenómenos de acumulação de poluentes à superfície das bacias de drenagem, em tempo seco, e de arrastamento e transporte, em tempo de chuva, são muito complexos e variam fortemente de local para local (Saget *et al.*, 1995; Deletic, 1998; citados por Gnecco *et al.*, 2005). Entre os fatores que afetam a qualidade das escoamentos pluviais, referem-se a hidrologia e clima locais, a morfologia e ocupação das bacias, a densidade do tráfego e a própria qualidade da água da chuva.

As escoamentos pluviais transportam partículas poluentes dissolvidas, coloidais e sólidas, numa mistura heterogénea que inclui compostos orgânicos e inorgânicos, nutrientes, óleos e gorduras e metais pesados. Estes poluentes resultam, principalmente, de atividades urbanas e do tráfego. Foi demonstrado por diversos autores que a carga de poluentes veiculada pelos caudais durante o início do hidrograma de cheia (fluxo inicial de cargas poluentes, designado por "first flush") pode ser superior à das águas residuais, em tempo seco (Artina *et al.*, 1999; Novonry e Chesters, 1981; citados por Gnecco *et al.*, 2005).

Deste modo, uma abordagem integrada dos sistemas de drenagem deverá envolver a gestão das águas pluviais e o controlo da poluição associada, através da implementação de medidas estratégicas apropriadas, de forma a proteger os meios recetores. Para o efeito, é essencial dispor de informação sobre as características locais das escoamentos pluviais.

No presente documento divulga-se o trabalho de caracterização das águas pluviais em meio urbano, efetuado na zona baixa da bacia de Alcântara, em Lisboa, Portugal. Os dados apresentados reportam-se a dois períodos experimentais, o primeiro de 11 de Novembro de 2005 a 23 de Março de 2006 (com um

total de quinze campanhas); o segundo de 17 de Fevereiro a 18 de Abril de 2008 (com um total de nove campanhas).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Seleção da bacia experimental e sua caracterização

A bacia experimental onde se procedeu à recolha das amostras de escoamentos pluviais, que abrange as sub-bacias D16 e D17 indicadas na Figura 1, inclui-se na bacia de drenagem Algés-Alcântara, afluente à ETAR de Alcântara, em Lisboa. Aquelas sub-bacias dispõem de sistemas de drenagem predominantemente unitários, com pequenas zonas do tipo separativo (cerca de 20%), em particular, junto ao Instituto Superior de Agronomia e a um bairro residencial situado na Rua Luiz de Camões.

Os locais de monitorização considerados neste estudo, que se identificam na Figura 2, são constituídos por sumidouros localizados em zonas distintas da sub-bacia da Alcântara (na zona da Ajuda). Tais locais foram selecionados atendendo aos seguintes critérios: *a)* inserção em zonas urbanizadas com características heterogéneas; *b)* disponibilidade de espaço dos sumidouros para a instalação dos recipientes para a recolha de amostras; e *c)* menor interferência possível de tráfego de forma a não dificultar a recolha de amostras.

No Quadro 1 apresentam-se, para cada secção de monitorização, a localização do sumidouro, as principais características das áreas servidas, bem como a área da sub-bacia contributiva direta (limitada a montante por outros dispositivos de interceção) e da sub-bacia potencial (que corresponde à totalidade da área que poderá contribuir para as afluências à secção de referência, desde o limite de cabeceira). Durante o primeiro período experimental, de 11 de Novembro de 2005 a 23 de Março de 2006, foram considerados todos os pontos de amostragem (Ferreira *et al.*, 2006); no segundo período experimental, de 17 de Fevereiro a 18 de Abril de 2008, a secção de monitorização S1 não foi considerada.

### 2.2. Descrição do trabalho experimental

O trabalho experimental consistiu na recolha de amostras de águas pluviais em seis dispositivos intercetores (caixas de sumidouros de grades). Para

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em novembro de 2012, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em novembro de 2012. Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 33, Nº 2, 59-72, novembro de 2012.  
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh33n2-5

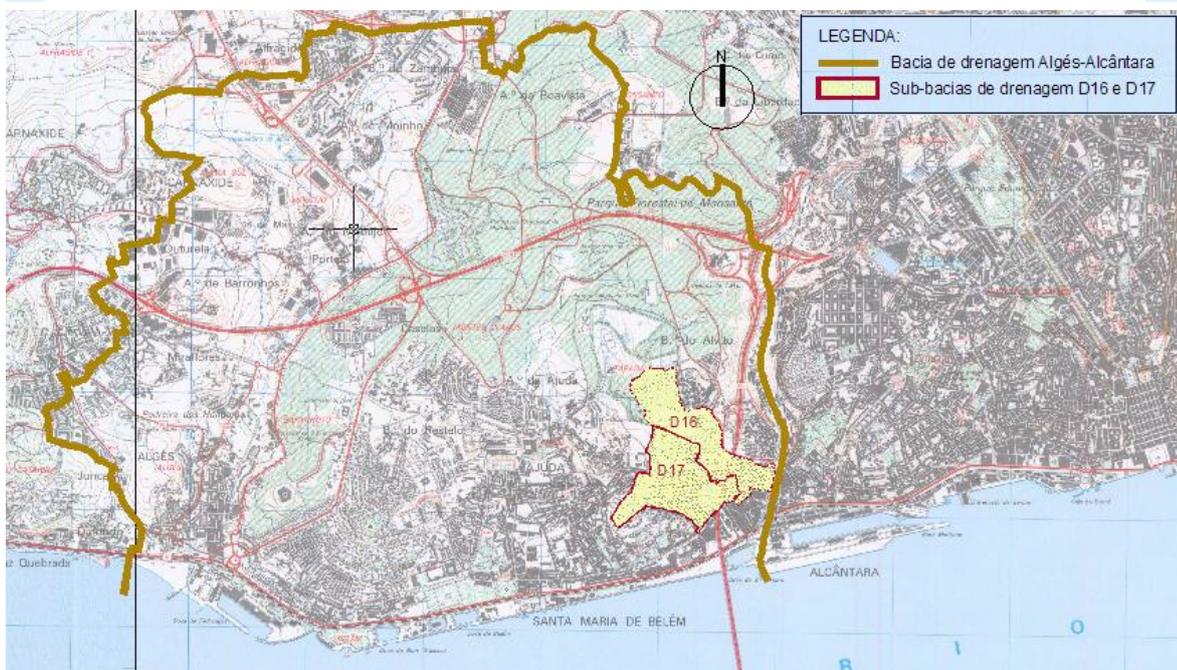


Figura 1 – Localização geral da bacia experimental, em Lisboa.

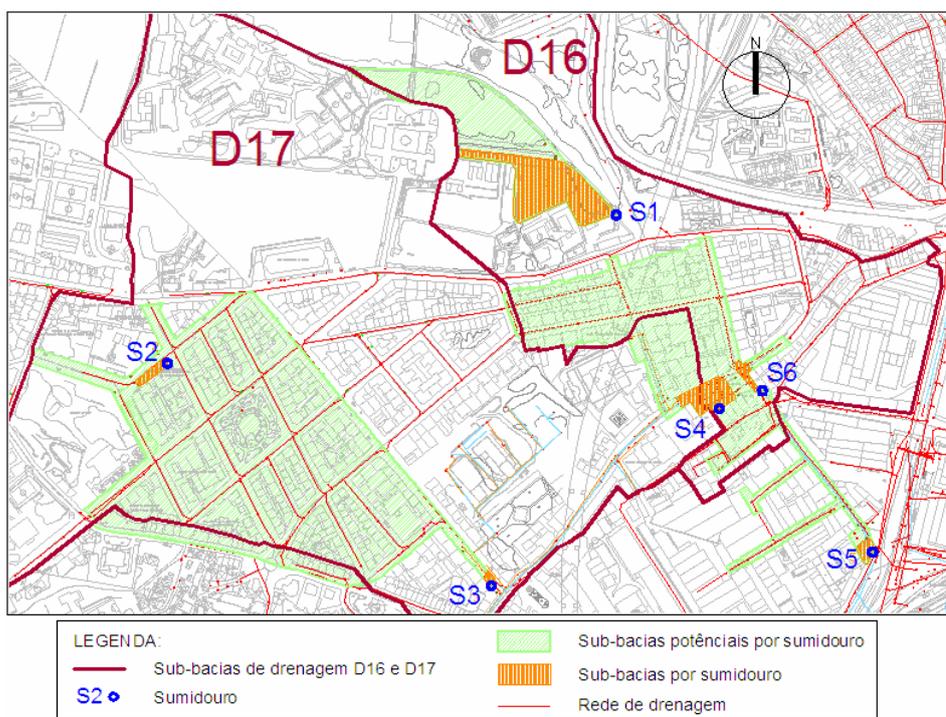


Figura 2 – Localização dos sumidouros considerados como secções de monitorização das escorrências pluviais, na zona baixa de Alcântara, em Lisboa.

**Quadro 1** – Caracterização das secções de monitorização.

| Id. | Local  | Observações  | Área [ha] |           |
|-----|--|--|-----------|-----------|
|     |  |  | contrib.  | potencial |
| S1  | Portão secundário do ISA, na Calçada da Tapada | Sub-bacia afluyente caracterizada pela reduzida ocupação populacional e reduzida impermeabilização, dados os grandes campos agrícolas existentes no Instituto.   | 0.84      | 2.22      |
| S2  | R. João de Barros                              | Localizado na zona de montante da bacia da Ajuda, junto ao Ministério do Planeamento e da Administração do Território. O local apresenta reduzido tráfego, pequenas moradias residenciais e grande quantidade de árvores nos passeios. | 0.05      | 0.16      |
| S3  | R. Luís de Camões                              | Zona residencial de tráfego moderado com muito comércio local.   | 0.01      | 10.70     |
| S4  | Largo das Fontainhas                           | Zona bastante plana, com muita actividade associada ao comércio, sendo caracterizada pelo intenso tráfego e pela existência de várias paragens de autocarro.   | 0.21      | 4.09      |
| S5  | R. Cozinha Económica                           | Zona bastante plana, estando o sumidouro implantado num parque de estacionamento em que existem diversas árvores de folha caduca.  | 0.05      | 5.27      |
| S6  | R. Fradesso da Silveira/ R. das Fontainhas     | Zona bastante plana, com actividades associadas ao comércio e tráfego intenso.   | 0.05      | 4.09      |

o efeito, procedeu-se à instalação, no interior dos sumidouros, de recipientes retangulares de plástico, com 50 cm de comprimento médio, cerca de 17 cm de largura e 12.5 cm de profundidade.

As campanhas experimentais foram efetuadas durante ou após a ocorrência de precipitações, desde que se tivesse procedido, anteriormente à chuvada, à limpeza dos recetáculos instalados nos sumidouros. As operações de limpeza consistiam no esvaziamento total dos recipientes, incluindo eventuais sedimentos depositados em tempo seco, bem como na remoção de resíduos e detritos acumulados nas grades dos sumidouros e nas valetas imediatamente adjacentes (nomeadamente folhas de árvores, pedras, papéis e plásticos).

Em cada campanha procedeu-se à recolha de cerca de 2.5 litros de amostra por sumidouro. Durante o

primeiro período experimental, foram avaliados em laboratório os seguintes parâmetros: carência química em oxigénio (CQO), carência bioquímica em oxigénio, aos 5 dias (CBO<sub>5</sub>), sólidos suspensos totais (SST) e bactérias coliformes (coliformes totais). Os frascos foram devidamente rotulados e as amostras mantidas a uma temperatura inferior a 4 °C. As análises foram efetuadas pelo Centro de Análises Químicas do Instituto Superior Técnico de acordo com os métodos analíticos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMEWW) (American Public Health Association, 1995) e, no caso das bactérias coliformes, seguindo o estipulado na norma MM 9.2. Durante o segundo período experimental procedeu-se adicionalmente à determinação dos parâmetros coliformes fecais (CF), *Escherichia coli* (*E.coli*) e *Enterococos intestinalis* (*E.int*). Os coliformes totais

são indicadores da qualidade higiênico-sanitária da água, enquanto que os coliformes fecais (incluindo a *E.coli*) são considerados indicadores de contaminação fecal. Os Enterococos intestinais, por serem bactérias altamente resistentes a condições adversas, representam melhor as condições de zonas balneares salinas. São bons indicadores de poluição fecal e permitem avaliar a qualidade das zonas balneares próximas à área estudada.

A recolha das amostras foi realizada de forma manual, misturando previamente o volume de líquido armazenado no interior dos recipientes de forma a assegurar a homogeneidade da mesma. Na Figura 3 apresentam-se, a título ilustrativo, algumas fotografias correspondentes à recolha de amostras durante a campanha experimental realizada a 27 de Novembro de 2005.

Os eventos pluviométricos ocorridos durante o primeiro período experimental, de 11/11/2005 a 23/03/2006, foram analisados com base na informação udográfica proveniente da estação climatológica do Instituto Geofísico Infante Dom Luiz (IGIDL), em Lisboa. Durante o segundo período experimental, de 07/01/2008 a 07/05/2008, procedeu-se à instalação de dois udómetros (marca NIVUS, Modelo RMT0), um localizado no interior do Instituto Superior de Agronomia (ISA), próximo da entrada da Calçada da Tapada (Udómetro 1), e outro localizado na cobertura do Instituto Superior de Ciências Policiais e Segurança Interna (ISCP/PSI) (Udómetro 2). As intensidades de precipitação registadas foram semelhantes em ambos os udómetros, tanto em magnitude, como em frequência.

Os registos de precipitação foram processados com

vista à separação dos eventos de precipitação, para o que se admitiu a aplicação simultânea dos seguintes critérios:

- a) intensidade de precipitação inferior a 0.25 mm/h, que se considera correspondente a um registo de precipitação residual, equivalendo a tempo seco;
- b) ocorrência de um período de tempo seco entre cada chuvada de 120 minutos. Este critério justifica-se atendendo ao facto de as sub-bacias em estudo apresentarem tempos de concentração reduzidos, claramente inferiores a este valor, garantindo-se assim que a resposta do sistema de drenagem a cada evento de precipitação se processa como um todo.

Durante o primeiro período experimental, o método de separação de eventos resultou em 55 eventos de precipitação. Na Figura 4 apresenta-se graficamente a precipitação horária registada (incluindo a realização de limpezas dos sumidouros e/ou de campanhas experimentais). Verifica-se que os picos de precipitação mais significativos ocorreram no início de Novembro e no início de Março, atingindo intensidades médias horárias de cerca de 16.5 e 17.0 mm/h, respetivamente.

Durante o segundo período experimental, o método de separação de eventos (baseado nos dados recolhidos no Udómetro 1) levou à identificação de 30 eventos de precipitação. Na Figura 5 apresenta-se graficamente a precipitação horária registada (incluindo a realização de campanhas experimentais, já que as limpezas ocorreram sempre na véspera de cada campanha). Ocorreu uma precipitação muito intensa a 18/02/2008, com intensidades médias horárias de 47.5 mm/h.



**Figura 3** – Recolha de amostras durante a campanha experimental de 27 de Novembro de 2005.

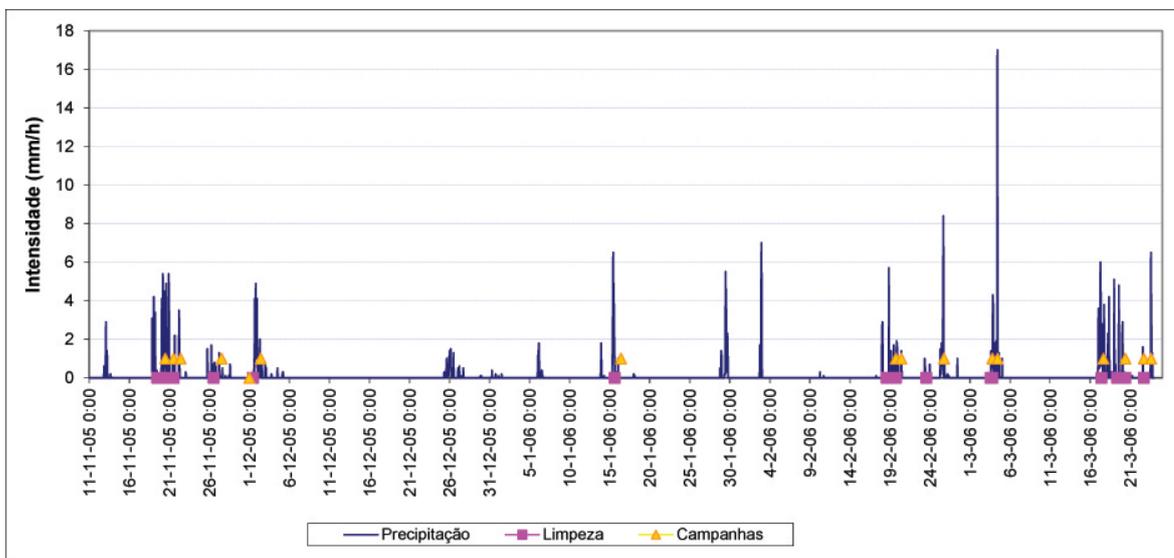


Figura 4 – Precipitação horária registada durante o primeiro período de realização das campanhas experimentais (de 11/11/2005 a 23/03/2006).

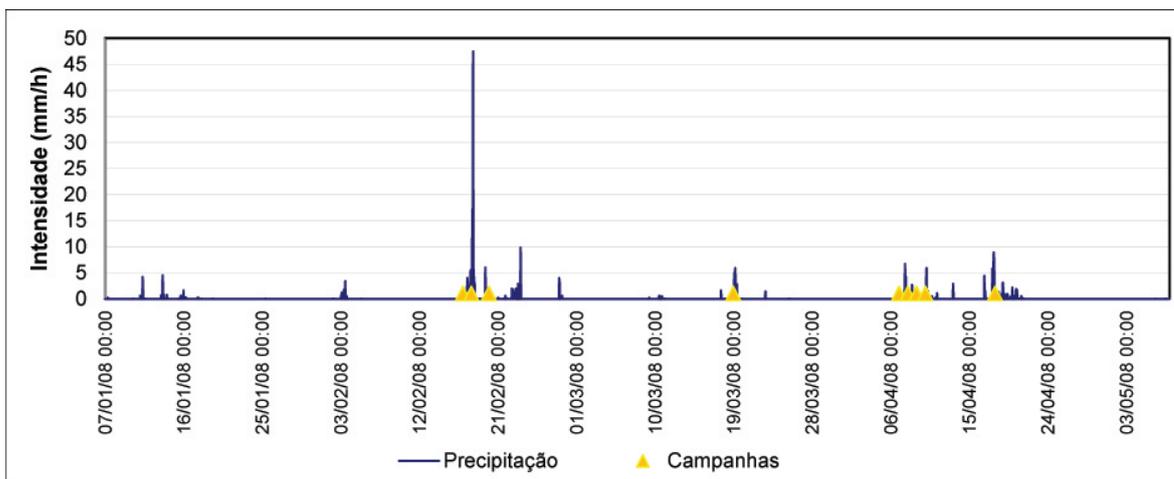


Figura 5 – Precipitação horária registada durante o segundo período de realização das campanhas experimentais (de 07/01/2008 a 07/05/2008), para o Udómetro 1.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1. Principais resultados obtidos

Os resultados obtidos para a qualidade das águas pluviais, no que se refere às concentrações médias por

campanha (ou seja, à média dos resultados obtidos nas diferentes secções de monitorização, por campanha experimental), constam do Quadro 2.

As concentrações médias por campanha foram comparadas com os valores fixados na legislação portuguesa (valores limite de emissão definidos pelo Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de Agosto) e na Diretiva

**Quadro 2** – Concentrações médias por campanha nos dois períodos experimentais.

| Campanha<br>[ - ]                    | Valores médios pond.          |                            |               |                   |                   |                          |                       |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
|                                      | CQO<br>[mg O <sub>2</sub> /l] | CBO <sub>5</sub><br>[mg/l] | SST<br>[mg/l] | CT<br>[NMP/100ml] | CF<br>[NMP/100ml] | E.Intest.<br>[NMP/100ml] | E.coli<br>[NMP/100ml] |
| <b>Primeiro período experimental</b> |                               |                            |               |                   |                   |                          |                       |
| C1                                   | 58.0                          | 6.2                        | 111.0         | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C2                                   | 93.7                          | 12.7                       | 184.0         | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C3                                   | 45.0                          | 6.0                        | 45.8          | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C4                                   | 156.8                         | 29.2                       | 132.8         | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C5                                   | 213.8                         | 49.2                       | 275.2         | 5.1E+5            | -                 | -                        | -                     |
| C6                                   | 168.8                         | 44.8                       | 142.8         | 2.0E+7            | -                 | -                        | -                     |
| C7                                   | 614.8                         | 64.5                       | 1109.0        | 7.9E+6            | -                 | -                        | -                     |
| C8                                   | 343.8                         | 66.5                       | 320.3         | 8.9E+5            | -                 | -                        | -                     |
| C9                                   | 254.3                         | 46.3                       | 1184.3        | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C10                                  | 238.7                         | 44.3                       | 550.7         | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C11                                  | 291.0                         | 35.8                       | 842.3         | -                 | -                 | -                        | -                     |
| C12                                  | 209.8                         | 25.8                       | 303.0         | 2.1E+7            | -                 | -                        | -                     |
| C13                                  | 99.7                          | 16.7                       | 295.0         | 1.3E+6            | -                 | -                        | -                     |
| C14                                  | -                             | -                          | -             | 1.3E+6            | -                 | -                        | -                     |
| C15                                  | 134.5                         | 10.0                       | 251.3         | 5.4E+5            | -                 | -                        | -                     |
| <b>Segundo período experimental</b>  |                               |                            |               |                   |                   |                          |                       |
| C1                                   | 93.0                          | 27                         | 261.0         | 5.2E+6            | 6.5E+5            | 1.3E+6                   | 6.5E+5                |
| C2                                   | 21.0                          | 10                         | 14.0          | 3.8E+4            | 2.8E+4            | 1.1E+4                   | 2.8E+4                |
| C3                                   | 42.0                          | 21                         | 21.0          | 1.3E+7            | 1.6E+5            | 1.3E+4                   | 1.6E+5                |
| C4                                   | 173.0                         | 20                         | 140.0         | 3.8E+5            | 1.6E+5            | 2.6E+5                   | 1.6E+5                |
| C5                                   | 185.0                         | 122                        | 135.0         | 3.0E+4            | 8.1E+3            | 2.5E+4                   | 8.1E+3                |
| C6                                   | 93.0                          | 37                         | 107.0         | 5.1E+4            | 2.2E+4            | 2.3E+4                   | 2.2E+4                |
| C7                                   | 232.0                         | 83                         | 55.0          | 2.2E+8            | 1.7E+6            | 9.9E+4                   | 1.7E+6                |
| C8                                   | 176.0                         | 30                         | 219.0         | 8.8E+5            | 7.8E+4            | 1.3E+5                   | 7.6E+4                |
| C9                                   | 338.0                         | 62                         | 421.0         | 1.2E+6            | 1.1E+5            | 8.1E+4                   | 1.1E+5                |

Comunitária 2006/7/CE, de 15 de Fevereiro. Conclui-se que apenas 40% e 60% dos resultados obtidos, respetivamente para o CBO<sub>5</sub> e CQO, respeitam os valores limite de emissão. Para o parâmetro SST, mais de 85% dos resultados experimentais não respeitam os valores limite de emissão. No que concerne aos coliformes totais e fecais, praticamente todos os resultados ultrapassam os valores máximos admissíveis para águas balneares. Concretamente para os parâmetros *Escherichia coli* e *Enterococcus intestinalis*, considerados no âmbito da Diretiva 2006/7/CE os melhores indicadores para águas salgadas e para águas doces interiores, respetivamente, os valores observados excedem consistentemente os valores máximos admissíveis, mesmo para uma água de qualidade suficiente. No entanto, deve-se salientar que estes valores dizem respeito ao meio recetor, pelo que os resultados registados podem ir ao encontro da legislação, caso o corpo hídrico apresente boa capacidade de diluição.

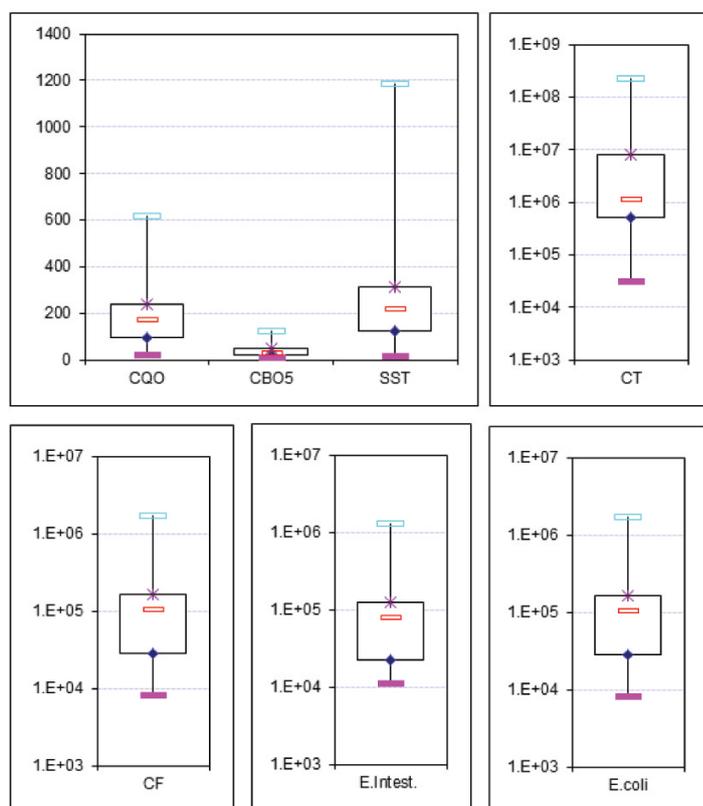
Os resultados de qualidade das águas pluviais foram submetidos a um tratamento estatístico com vista à análise da sua variabilidade. No Quadro 3 apresenta-se a síntese dos principais parâmetros estatísticos descritivos relativos à qualidade das escorrências pluviais da zona baixa de Alcântara, referentes aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos em estudo. A representação gráfica dos extremos, quartis e mediana, que permite aferir relativamente à variabilidade e simetria da amostra, é ilustrada pela Figura 6. Verifica-se que a concentração média em

CQO e em SST das escorrências pluviais na zona Baixa de Alcântara é de 186 mg/l e de 310 mg/l. No que se reporta aos parâmetros microbiológicos, observaram-se as seguintes concentrações médias: 2 x 10<sup>7</sup> NMP/100 ml para coliformes totais, 3 x 10<sup>5</sup> NMP/100 ml para coliformes fecais, 2 x 10<sup>5</sup> NMP/100 ml para *Escherichia coli* e 3 x 10<sup>6</sup> NMP/100 ml para *Enterococcus intestinalis*. Com base na totalidade dos valores obtidos em cada secção de monitorização (Ferreira, 2006; Gondim, 2008), e de forma a aferir em que medida os parâmetros de qualidade se encontram correlacionados entre si, ou com as características associadas à precipitação (nomeadamente com o período de tempo seco antecedente ao evento, e com a intensidade máxima e média correspondente a cada campanha), procedeu-se à determinação de matrizes de correlação. Os resultados obtidos atestam a existência de uma forte correlação, quer entre a CBO<sub>5</sub> e a CQO, quer entre a CQO e os SST. Verifica-se igualmente que os parâmetros físico-químicos se encontram correlacionados especialmente com o período de tempo seco antecedente, mas também, em certa medida, com as intensidades máxima e média da precipitação. Os coliformes totais não se encontram correlacionados com o período de tempo seco antecedente, embora apresentem uma correlação razoável com a intensidade máxima e média da precipitação.

No que diz respeito, concretamente, à relação entre a CBO<sub>5</sub> e a CQO (razão CBO<sub>5</sub>/CQO), grande parte das amostras apresentam CBO<sub>5</sub>/CQO inferiores a 0.4,

**Quadro 3** – Síntese dos principais parâmetros estatísticos descritivos relativos à qualidade das águas pluviais da zona baixa de Alcântara, em Lisboa.

| Grandeza                        | CQO<br>[mg/l] | CBO <sub>5</sub><br>[mg/l] | SST<br>[mg/l] | CT<br>[NMP/100ml] | CF<br>[NMP/100ml] | E.Intest.<br>[NMP/100ml] | E.coli<br>[NMP/100ml] |
|---------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| Concentrações médias observadas | 186           | 38                         | 310           | 1.7E+7            | 3.2E+5            | 2.2E+5                   | 3.2E+5                |
| Intervalo de valores observados | 21-615        | 6-122                      | 14-1184       | 3E+04 - 2E+08     | 8E+03 - 2E+06     | 1E+04 - 1E+06            | 8E+03 - 2E+06         |
| Desvio padrão                   | 131           | 28                         | 323           | 5.3E+7            | 5.4E+5            | 4.2E+5                   | 5.4E+5                |
| Variância                       | 17059         | 781                        | 104252        | 2.8E+15           | 2.9E+11           | 1.7E+11                  | 3.0E+11               |
| Nº de dados da amostra          | 23            | 23                         | 23            | 17                | 9                 | 9                        | 9                     |



**Figura 6** – Representação gráfica, do tipo “caixa dos bigodes”, da variabilidade e simetria dos valores de qualidade das águas pluviais da zona baixa de Alcântara, em Lisboa.

o que indicia que as substâncias presentes nas águas pluviais são dificilmente biodegradáveis (Henze *et al.*, 1997).

Uma análise estatística similar à anteriormente apresentada foi efetuada para os valores de qualidade obtidos por secção de monitorização. Verifica-se que as menores concentrações de poluentes correspondem à secção de monitorização S1, que se encontra a jusante de uma sub-bacia de reduzida ocupação populacional e elevada permeabilidade, similar a uma bacia de drenagem “rural”. No entanto, as concentrações em CT registadas ainda são relevantes, da ordem de grandeza de  $10^5$ .

A secção de monitorização S2, que serve uma sub-bacia de cabeceira implantada num local de reduzido tráfego, apresenta concentrações em CQO e  $CBO_5$  reduzidas, sendo mais elevadas em termos de SST e CT. No sumidouro S6, localizado numa

zona plana e de reduzida ocupação habitacional, as cargas poluentes registadas são semelhantes às da secção de amostragem S2, embora a contaminação microbiológica seja mais relevante.

As secções de amostragem S4 e S5 são as que apresentam, genericamente, cargas poluentes mais elevadas, o que se pode justificar atendendo à localização e ocupação das respetivas sub-bacias. De facto, estes sumidouros localizam-se numa zona topograficamente plana, situada imediatamente a jusante do sopé da encosta, com muita atividade associada ao comércio, com tráfego intenso e com várias paragens de autocarro. A secção de monitorização S5, implantada, ainda assim, numa zona de tráfego mais intenso e de maior passagem de peões, é a que regista maiores concentrações para todos os parâmetros analisados.

### 3.2. Análise dos resultados de precipitação e qualidade das escozrências pluviais

Uma vez aferidas as correlações existentes entre os parâmetros analisados, procurou-se, com base nos resultados do primeiro período experimental, seleccionar um modelo que permitisse estimar as cargas poluentes médias veiculadas pelas escozrências pluviais para um determinado evento pluviométrico. Os modelos equacionados consideram como variáveis dependentes os parâmetros CQO, SST e CBO<sub>5</sub>, e como variáveis independentes o período de tempo seco antecedente, a intensidade máxima e a intensidade média da precipitação.

No Quadro 4 apresentam-se, para cada campanha realizada no primeiro período experimental, o tempo seco antecedente respetivo (número de horas decorrido desde o evento de precipitação anterior e o evento pluviométrico em análise), a intensidade máxima e a intensidade média da precipitação, registadas desde a limpeza dos sumidouros até à recolha das amostras. As campanhas C7 e C8 (bem como as C10 e C11) foram realizadas durante o mesmo evento pluviométrico. Assim, de forma a ter em conta o efeito de lavagem de parte das partículas acumuladas em tempo seco à superfície das sub-bacias de drenagem, ocorrido durante a fase inicial do hidrograma, considerou-se, simplifcadamente, que o período de tempo seco antecedente para as campanhas C8 e C11 corresponderia a metade do decorrido até ao início do evento em análise. Adicionalmente, atendendo ao facto de a Câmara Municipal de Lisboa ter procedido, anteriormente à realização da campanha C12, à limpeza do arruamento na zona dos descarregadores S5 e S6, apenas se considerou o período de tempo decorrido desde a limpeza dos arruamentos e o início do evento pluviométrico relativo a esta campanha. As equações de regressão lineares (simples e múltiplas) estabelecidas são do seguinte tipo:

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + \dots \quad (1)$$

em que:

- Y variável dependente (concentração média para um determinado parâmetro);
- a ordenada na origem;
- b<sub>i</sub> coeficientes relativos às variáveis dependentes (declive);
- X<sub>i</sub> variáveis independentes.

**Quadro 4** - Períodos de tempo seco antecedente e intensidades da precipitação por campanha do primeiro período experimental.

| Campanha<br>[-] | TS efectivo<br>[h] | Imáx LR<br>[mm/h] | Iméd LR<br>[mm/h] |
|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| C1              | 18.0               | 5.4               | 2.9               |
| C2              | 9.0                | 5.4               | 2.0               |
| C3              | 12.0               | 3.5               | 1.6               |
| C4              | 83.0               | 1.3               | 0.6               |
| C5              | 98.0               | 4.9               | 1.8               |
| C6              | 32.0               | 1.0               | 0.4               |
| C7              | 359.0              | 5.7               | 0.8               |
| C8              | 179.5              | 1.9               | 0.7               |
| C9              | 44.0               | 8.4               | 1.9               |
| C10             | 142.0              | 1.4               | 0.9               |
| C11             | 71.0               | 17.0              | 3.0               |
| C12             | 143.0              | 2.8               | 1.5               |
| C13             | 8.0                | 4.8               | 1.4               |
| C14             | 54.0               | 1.6               | 0.7               |
| C15             | 19.0               | 6.5               | 1.4               |

A seleção das variáveis independentes com significado estatístico para cada regressão foi efetuada através de um teste de hipóteses com um nível de significância de 5%, recorrendo à estatística *t-Student* (na prática, se o valor da estatística t for inferior a cerca de 2, não se pode concluir que a variável independente tenha significado estatístico para a regressão).

Para cada uma das variáveis dependentes foram analisadas, individual ou conjuntamente, as regressões face às diversas variáveis independentes relevantes ou tendo em conta os respetivos logaritmos ou exponenciais, de modo a seleccionar os modelos que melhor explicassem as variáveis dependentes. Este estudo baseou-se no método dos mínimos quadrados ordinários e na análise de variância (ANOVA), tendo sido calculados os coeficientes de determinação (*R*<sup>2</sup>)

e os coeficientes de determinação múltipla ajustados ( $R_{aj}^2$ ) para cada regressão, dados pelas equação (2) e (3), respetivamente:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i + \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i + \bar{Y})^2} \quad (2)$$

$$R_{aj}^2 = 1 - \left[ (1 - R^2) \times (n - 1) / (n - k - 1) \right] \quad (3)$$

em que:

$R^2$  coeficiente de determinação;

$\hat{Y}_i$  valor estimado da variável dependente para a observação  $i$ ;

$\bar{Y}$  valor médio da variável dependente;

$n$  número de valores da amostra;

$R_{aj}^2$  coeficiente de determinação ajustado;

$k$  número de variáveis independentes na equação de regressão.

No Quadro 5 apresentam-se, resumidamente, para a CQO, SST e CBO<sub>5</sub>, os parâmetros dos modelos que revelaram possuir significado estatístico, incluindo o coeficiente de determinação ajustado, a ordenada na origem e os coeficientes associados a cada variável independente com significado estatístico para a regressão.

A avaliação da capacidade explicativa do modelo teve em conta a minimização dos respetivos resíduos (efeitos não captados pela componente determinística) e foi aferida utilizando o coeficiente de determinação ajustado, que traduz a proporção da variação explicada face à variação total da variável dependente. Deste modo, a seleção da equação com melhor capacidade explicativa foi efetuada atendendo aos valores dos coeficientes de determinação ajustados que constam no Quadro 5.

Sugerem-se, no âmbito deste trabalho, os modelos correspondentes às equações (4) a (7), que permitem avaliar a carga poluente média das escorrências pluviais na zona baixa de Alcântara, em Lisboa, tendo em conta o período de tempo seco antecedente e a intensidade da precipitação. Os modelos foram

**Quadro 5** – Síntese dos parâmetros dos principais modelos estatisticamente significativos para os parâmetros físico-químicos considerados.

| Parâmetros                                     | $R_{aj}^2$ | a        | $b_1$  | $b_2$   | $b_3$ |
|--|------------|----------|--------|---------|-------|
| <b>CQO</b>                                     |            |          |        |         |       |
| $X_1 = TS_{ant}$                               | 0.838      | 87.482   | 1.394  | -       | -     |
| $X_1 = TS_{ant}; X_2 = I_{máx}$                | 0.908      | 35.577   | 1.438  | 9.616   | -     |
| $X_1 = TS_{ant}; X_2 = \exp(I_{máx})$          | 0.874      | 78.127   | 1.409  | 0.000   | -     |
| $X_1 = TS_{ant}; X_2 = \ln(I_{máx})$           | 0.874      | 33.778   | 1.427  | 38.223  | -     |
| $X_1 = TS_{ant}; X_2 = I_{máx}; X_3 = I_{méd}$ | 0.946      | 94.890   | 1.291  | 17.895  | -     |
| <b>SST</b>                                     |            |          |        |         |       |
| $X_1 = TS_{ant}$                               | 0.211      | 236.197  | 2.004  | -       | -     |
| $X_1 = TS_{ant}; X_2 = I_{máx}$                | 0.555      | -55.790  | 2.252  | 54.096  | -     |
| $X_1 = TS_{ant}; X_2 = \ln(I_{máx})$           | 0.485      | -120.704 | 2.222  | 254.023 | -     |
| <b>CBO<sub>5</sub></b>                         |            |          |        |         |       |
| $X_1 = TS_{ant}$                               | 0.506      | 18.982   | 0.158  | -       | -     |
| $X_1 = \ln(TS_{ant})$                          | 0.636      | -21.053  | 13.908 | -       | -     |

deduzidos para as sub-bacias em estudo (ou seja, para a zona baixa de Alcântara) e para os seguintes intervalos de valores:

- período de tempo seco antecedente entre 8 e 359 horas;
- intensidade máxima da precipitação de 17 mm/h;
- intensidade média da precipitação de 3 mm/h.

em que:

$$CQO = 94.890 + 1.291 \times TS_{ant} + 17.895 \times I_{m\acute{a}x} - 59.455 \times I_{m\acute{e}d} \quad (4)$$

$$CQO = 35.577 + 1.438 \times TS_{ant} + 9.616 \times I_{m\acute{a}x} \quad (5)$$

$$SST = -55.790 + 2.252 \times TS_{ant} + 54.096 \times I_{m\acute{a}x} \quad (6)$$

$$CBO_5 = -21.053 + 13.908 \times \ln(TS_{ant}) \quad (7)$$

CQO - concentração média da carência química em oxigénio por campanha (mg/l);

SST - concentração média dos sólidos suspensos totais por campanha (mg/l);

CBO<sub>5</sub> - concentração média da carência bioquímica em oxigénio, aos 5 dias, por campanha (mg/l);

TS<sub>ant</sub> - período de tempo seco anterior à chuvada (h);

I<sub>máx</sub> - intensidade máxima da precipitação ocorrida desde a limpeza antecedente (mm/h);

I<sub>méd</sub> - intensidade média da precipitação ocorrida desde a limpeza antecedente (mm/h).

Para a CQO, a equação que revela melhor qualidade de ajustamento, logo a que se considera possuir melhor capacidade explicativa, é a (4), que apresenta um valor de  $R_{aj}^2$  de 0.95. No entanto, também se recomenda o modelo para a CQO descrito pela equação (5) visto ser mais simples (com menor número de variáveis independentes) e também apresentar uma elevada capacidade explicativa (traduzida por um valor de  $R_{aj}^2$  de 0.91).

O modelo menos preciso é o relativo aos SST, para o qual o valor de  $R_{aj}^2$  ascende a 0.56, que é manifestamente reduzido. Quanto à CBO<sub>5</sub>, a equação de regressão proposta apresenta um  $R_{aj}^2$  de 0.64 e inclui apenas uma variável explicativa, já que a adição de outras variáveis independentes não contribuiu para a melhoria dos resultados da regressão. Esta constatação, embora não facilmente compreensível do ponto de vista físico-químico, resulta da análise estatística directa dos dados de campo e pode ser justificada atendendo à

grande variabilidade das razões CBO<sub>5</sub>/CQO.

Relativamente aos coliformes totais, não é possível estabelecer qualquer equação de regressão que contribua, de forma minimamente significativa, para a explicação da variação da poluição microbiológica atendendo às características da precipitação.

De forma a validar os modelos anteriormente propostos, aplicaram-se as equações (4) a (7) para estimar as cargas poluentes associadas às águas pluviais das campanhas realizadas durante o segundo período experimental. O tempo seco antecedente, a intensidade máxima e a intensidade média da precipitação para cada campanha efetuada constam do Quadro 6.

Esta metodologia de validação permitiu concluir que

**Quadro 6** - Períodos de tempo seco antecedente e intensidades da precipitação por campanha do segundo período experimental.

| Campanha<br>[ - ] | TSant<br>(h) | Imax<br>(mm/h) | Imed<br>(mm/h) |
|-------------------|--------------|----------------|----------------|
| C1                | 329          | 4.0            | 2.4            |
| C2                | 3            | 47.5           | 6.7            |
| C3                | 27           | 6.0            | 2.3            |
| C4                | 6            | 5.9            | 2.3            |
| C6                | 5            | 2.7            | 0.9            |
| C7                | 3            | 0.1            | 0.0            |
| C8                | 32           | 5.9            | 2.2            |
| C9                | 15           | 8.9            | 1.7            |

apenas os modelos relativos à CQO, que apresentam coeficientes de determinação ajustados superiores a 0.90, permitem estimar com alguma precisão os níveis de contaminação das águas pluviais. Tal facto é ilustrado pela Figura 7 que contém a representação gráfica dos valores observados e estimados com base nas equações (4) e (5), para o primeiro e segundo períodos experimentais), através do qual se validaram os modelos propostos. Refere-se que as campanhas C1 e C2 do segundo período experimental, associadas a um evento pluviométrico de elevada intensidade

ocorrido após um longo período de tempo seco, não se encontram abrangidas pelas condições em que foram deduzidas aquelas equações.

Para os parâmetros CBO<sub>5</sub> e SST os valores estimados diferem consideravelmente dos determinados laboratorialmente, não sendo considerados válidos para estimativa de cargas poluentes na zona baixa de Alcântara.

#### 4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

As águas pluviais transportam diversos poluentes acumulados à superfície das bacias de drenagem em tempo seco, que resultam sobretudo de atividades urbanas e do tráfego. No presente documento divulga-se o trabalho efetuado na zona baixa de Alcântara, em Lisboa, com vista à caracterização das águas pluviais em meio urbano.

Os resultados das campanhas realizadas, no que se refere aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos, foram submetidos a um tratamento estatístico com vista à análise da sua variabilidade, tanto em função dos eventos pluviométricos, como das secções de amostragem.

Verifica-se que a concentração média em CQO e em SST das escoorrências pluviais na zona Baixa de Alcântara é de 186 mg/l e de 310 mg/l. No que se reporta aos parâmetros microbiológicos, observaram-se as seguintes concentrações médias: 2 x10<sup>7</sup> NMP/100 ml para coliformes totais, 3x10<sup>6</sup> NMP/100 ml para coliformes fecais, 2 x10<sup>5</sup> NMP/100 ml para *Escherichia coli* e 3x10<sup>6</sup> NMP/100 ml para *Enterococos*

*intestinais*. Os elevados valores médios referentes às concentrações CQO, SST e parâmetros microbiológicos merecem relevo, uma vez que indicam um significativo impacto no meio recetor, em resultado da descarga de escoorrências pluviais. De facto, os valores apurados na grande maioria das campanhas efetuadas excedem os valores fixados na legislação portuguesa para a descarga de efluentes em águas balneares.

Tal como referido por Dean *et al.* (2002), Gnecco *et al.* (2005) e Gromaire-Mertz *et al.* (1999), verifica-se a existência de uma forte correlação entre as concentrações em SST e em CQO nas escoorrências pluviais. Constatam-se, igualmente, a variação das concentrações das escoorrências de evento para evento, sendo reduzidos os valores observados da razão CBO<sub>5</sub>/CQO, o que indicia a difícil biodegradabilidade da matéria orgânica presente nas escoorrências pluviais.

Adicionalmente, à semelhança dos estudos realizados na Itália em Paris (Gnecco *et al.*, 2005; Gromaire-Mertz *et al.*, 1999), verifica-se que os parâmetros físico-químicos se encontram sobretudo correlacionados com o período de tempo seco antecedente, mas também com a intensidade máxima e média da precipitação.

As regressões lineares múltiplas efetuadas a partir dos dados do primeiro período experimental conduziram a equações que permitem avaliar as concentrações médias em CQO, CBO<sub>5</sub> e SST das escoorrências pluviais, considerando variáveis independentes similares às do estudo de Saget *et al.* (1998), para as bacias parisienses de Vèlizy, Centre Urbain e Ullis Sud. No entanto, a aplicação destas equações para a estimativa das cargas poluentes correspondentes às campanhas

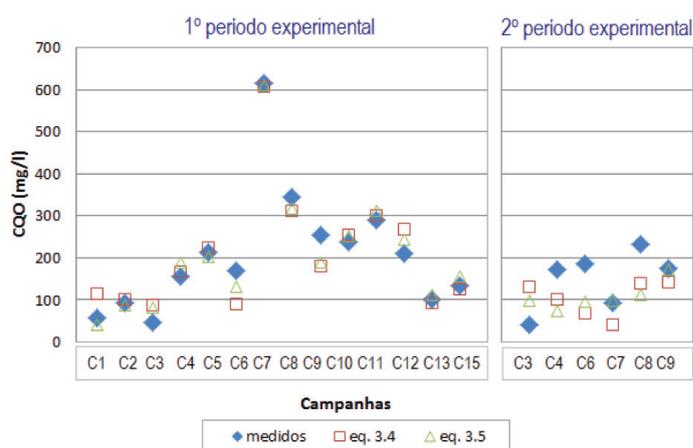


Figura 7 – Validação dos modelos propostos para estimativa das concentrações de CQO das águas pluviais na zona baixa de Alcântara.

do segundo período experimental apenas validou os modelos relativos ao parâmetro CQO.

Os modelos apresentados poderão ser melhorados caso se disponha de mais resultados experimentais, obtidos pela realização de campanhas suplementares para a caracterização das escorrências pluviais, idealmente realizadas noutras bacias de Lisboa e durante um período de tempo superior.

## BIBLIOGRAFIA

Choe J.S., Bang K.W., Lee J.H. (2002). Characterization of surface runoff in urban areas. *Water Science & Technology* Vol 45 No 9 pp 249–254.

Dean C., Blazier A., Krielow E., Cartledge F., Tittlebaum M., Sansalone J. (2002). What You Did Not Know About Storm Water Chemistry And Were Afraid to Ask. Proceedings of the *9th International Conference on Urban Drainage*, 8-13 September, Portland, Oregon.

Ferreira F. (2006). *Modelação e gestão integrada de sistemas de águas residuais. Dissertação de Doutoramento*. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

Ferreira F., Matos J., Sebastião A. (2006). *Controlo de qualidade de escorrências pluviais da cidade de Lisboa*. Actas do 12º ENaSB, Cascais, 24 a 27 de Outubro de 2006.

Field R., Sullivan D., Tafuri A.N. (2003). *Management*

*of Combined Sewer Overflows*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.

Gnecco I., Beretta C., Lanza L.G., La Barbera P. (2005). Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmospheric Research* 77, 60-73.

Gondim R. (2008). Qualidade das águas pluviais em meio urbano. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.

Gromaire-Mertz M.C., Garnaud S., Gonzalez A., Chebbo G. (1999). Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology* Vol 39 No 2 pp 1–8.

Henze M., Harremöes P., la Cour Jansen J., Arvin E. (1997). *Wastewater treatment: biological and chemical processes*. Springer-Verlag Telos; 2nd edition.

Saget A., Gromaire-Mertz M.C., Deutsch J.C., Chebbo G. (1998). Extent of Pollution in Urban Wet Weather Discharges. BHS Int. Conference on Hydrology in a Changing Environment, 6-10 July, Exeter, UK.

Taebi A., Droste R.L. (2004). Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater. *Science of the Total Environment*, 327(1-3), pp. 175-184.